

## データ駆動型観光を目指したオホーツク地域の 上位蜃気楼発生予測・公開システムの開発

### Development of forecasting and web publishing systems for superior mirage occurrence in the Okhotsk region aimed at the data-driven tourism

館山 一孝<sup>1</sup>, 佐藤 トモ子<sup>2</sup>, 佐藤 和敏<sup>1</sup>, 道木 泰成<sup>1</sup>, 小林 一人<sup>3</sup>, 鈴木 一志<sup>4</sup>  
Kazutaka Tateyama<sup>1</sup>, Tomoko Sato<sup>2</sup>, Kazutoshi Sato<sup>1</sup>, Yasunari Doki<sup>1</sup>, Kazuhito Kobayashi<sup>3</sup>,  
Kazushi Suzuki<sup>4</sup>

Corresponding author: tateyaka@mail.kitami-it.ac.jp (K. Tateyama)

Forecasting and web publishing system for superior mirage occurrence in the Okhotsk region was attempted to develop by measuring vertical profile of air temperature in the surface boundary layer using LPWA (Low Power Wide Area) network thermometers on the tower. Possibility to predict the formation of the thermocline from the integrated value of the temperature difference between the top and bottom of tower was suggested.

#### 1. はじめに

##### 1.1 オホーツク地域の上位蜃気楼

蜃気楼は、光が異なる温度の空気層を通過することで曲がり、景色が通常と異なって見える気象光学現象である<sup>1)</sup>。温度の急変などによって上暖下冷の急勾配の気温分布が形成されるとき、この温度変化層の中で遠景が反転あるいは伸長虚像として上方に現れる「上位蜃気楼」が発生することがある。上位蜃気楼は限られた地域で条件を満たしたときのみ現れる現象であるが日本各地で観測されており、富山湾が最も有名である。北海道では少なくとも16か所以上で上位蜃気楼の観測報告があり、沿岸部だけでなく内陸の湖でも観測されている<sup>2)</sup>。

佐藤<sup>3)</sup>によると、北海道のオホーツク地域は日本で唯一流氷の蜃気楼である幻氷が見られるだけでなく、蜃気楼の発生頻度が年間60日にも達しており、国内のみならず世界でも屈指の蜃気楼発生地域であることが明らかになってきた。石原<sup>4)</sup>は斜里町内の消防やぐらの10m高と5m高に設置した気温計と定点カメラによる観測を行い、冬季の斜里周辺で発生する上位蜃気楼の気象条件を報告した。館山<sup>5)</sup>はオホーツク地域の上位蜃気楼の発生予測を目的とし、斜里町内の鉄塔の42m高、28m高、7m高に省電力広域無線通信 (Low Power Wide Area: LPWA) 式気温センサを設置し

て、気温の鉛直分布のリアルタイム観測を行い、最上部と最下部の気温差から上位蜃気楼の発生を予測できる可能性を示した。

##### 1.2 上位蜃気楼の発生予測

上位蜃気楼の発生予測は富山湾と石狩湾において行われている。魚津市ではウェザーニューズ<sup>6)</sup>と日本気象協会<sup>7)</sup>が、上位蜃気楼の発生と気象条件との統計的な関係を明らかにして予測モデルを構築し、魚津市のホームページ上で蜃気楼の発生予測を公開している。小樽市では北海道・東北蜃気楼研究会と小樽市総合博物館が発生予測を行った事例があり<sup>8)</sup>、予報をFacebook等で発信している。これらの上位蜃気楼発生予報は、予想天気図を用いた総観場の状況や地上予想気温などから総合的に判断して行われている。

筆者らは、文部科学省のデータ統合・解析システム DIAS を情報基盤とし、斜里町内の鉄塔に設置した気温データと気象庁の数値予報データ等を DIAS 上で融合解析することで上位蜃気楼の発生予測を行うことを目指している。その第一歩として、本研究では2019年の斜里町鉄塔気温データと現地目視観測結果の比較を行い、上位蜃気楼の発生と気象条件、特に地表面付近の気温の鉛直分布と風の条件について検討を行った。

<sup>1</sup>北見工業大学 地球環境工学科

<sup>2</sup>知床・蜃気楼幻氷研究会

<sup>3</sup>株式会社構研エンジニアリング

<sup>4</sup>シスコン株式会社

School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

Shiretoko Mirage Research

Koken Engineering Co., Ltd.

Syscon, Inc.

### 1. 3 データ駆動型観光

一定の季節、地形、植生や気象条件を満たす場合に絶景と称される景色が見られるが、常時見られる景色ではないため、観光資源としての利用は困難であった。株式会社 JTB は 2015 年度から経済産業省の助成を受けて「観光予報プラットフォーム」を開発し、気象データを用いて雲海等の出現予測を行っている<sup>9)</sup>。本研究は、このような気象・雪氷現象に起因する複数の絶景の発生を科学的に予測し絶景を観光資源化することで、能動的に観光客を誘導し、地域を活性化する北海道版データ駆動型観光を目指している。本研究はそのモデルケースとして、上位層気楼の発生予測を行うものである。

## 2. データと解析方法

### 2. 1 鉄塔気温データ

株式会社構研エンジニアリングとシスコ株式会社によって開発された LPWA 式気温センサ<sup>9)</sup>を 2019 年 2 月 15 日から斜里町内の鉄塔の 42m 高、28m 高、7m 高の 3 か所に設置し、10 分に 1 回の頻度で気温の鉛直分布を測定した。本研究において、 $-18\sim 36^{\circ}\text{C}$ の温度域で運用実績があり、LPWA の通信は障害物の無い見通しの直線距離で最大約 20km の通信が可能であることが確認された。LPWA 親機から携帯電話回線を通じて学術情報ネットワーク基盤であるモバイル SINET に接続し、1 時間に 1 回の頻度で DIAS へデータを送信している。将来的に複数の鉄塔気温データを DIAS と接続し、DIAS が有する気象庁の数値予報データと融合解析することで、各地の上位層気楼のピンポイント発生予測を行うことを計画している。層気楼の発生予測情報は、DIAS のアプリケーションとして開発された「知床ポータル」を通じて提供する。図 1 に本研究で開発する層気楼発生予測・公開システムの概念図を示す。



図 1 層気楼発生予測・公開システムの概念図

### 2. 2 アメダス風向風速データ

上位層気楼発生時の風向・風速を調査するため、

斜里町のアメダスのデータを使用した。斜里町アメダスは、鉄塔から約 500m 離れた地点にある。

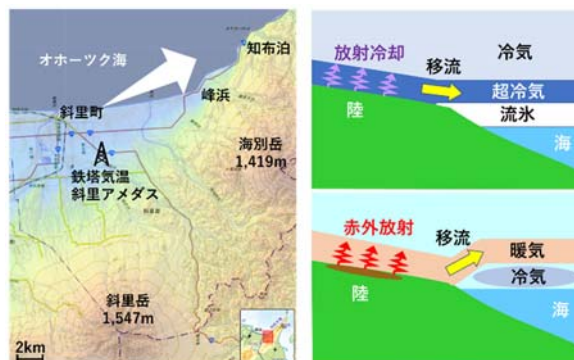


図 2 北海道斜里町の地図。国土地理院地図を使用。  
図 3 上位層気楼の発生の概念図。上：冬型，下：春型。

### 2. 3 層気楼目視観測

知床層気楼・幻氷研究会によって現地で観測された目視データを用いた。観測項目は、観測日時・場所、層気楼の種類・規模・方向、写真などである。層気楼の規模については観測者の主観により、大・中・小の 3 段階で判断している。観測エリアは網走市から小清水町、斜里町、ウトロにかけた沿岸部で行われている。図 2 は気温をモニタリングしている鉄塔の位置を示している。本研究では鉄塔気温と比較するため、図 2 の白色の矢印に示す斜里町から知床半島の付け根である峰浜～知布泊方向の海上に見られる上位層気楼の発生予測について検討した。目視観測は不定期で行われており、11 時から 13 時に目視観測が実施されることが多い。2019 年 2 月 15 日から 5 月 31 日の期間で、エリア全体では 25 回、白色矢印の方角では 6 回の上位層気楼が観測された。

## 3. 解析結果

### 3. 1 気温の高低差

石原ら<sup>4)</sup>は冬季の斜里周辺で発生する上位層気楼の気象条件として、図 3 の上図に示すように晴天時に放射冷却によって陸上で発生した冷氣塊が斜面降下風や海陸風によって海上に移流して上暖下冷の空気層（冷氣－超冷氣）を形成する「冬型」の上位層気楼が発生し、このとき 5m/s 以下の弱い南寄りの風が吹いていることを示した。このほかに、図 3 の下図に示すように暖気塊が移流して上暖下冷の空気層（暖気－冷氣）を形成す

る「春型」の上位層気楼のパターンがある。春型の場合でも、晴天時は地表面付近で放射冷却が起きている。本研究はこのように晴天時の放射冷却による地表面付近の冷気層の形成・発達を鉄塔気

温計によって捉えることで、上位層気楼の発生予測を行うことが可能か検討した。

上位層気楼を発生させる温度変化層は、放射冷却で生じた冷気塊の強度に関係すると仮定し、冷気塊の強度を表す指標として、鉄塔の 42m 高と 7m 高さの気温差の正の値を積分した。積分区間は 12 時から翌日 12 時である。気温差積分値と目視観測された上位層気楼の発生の有無および規模を比較した結果、積分値が 205 から 309 °C・10 分の範囲では目視規模・大の場合が多く、積分値が 131 から 165 °C・10 分の範囲では目視規模・中、積分値が 10 から 99 °C・10 分の範囲では目視規模・小が観測されるケースが多かった。また、目視規模・大が観測された時間帯は 11 時から 13 時である場合が多く、この時間帯はお昼休みで観測者が観察する頻度が高いという事情があるものの、気温が最も高くなる時間帯でもあり、海上に移流した冷気と周辺の空気との温度差が最も大きくなることも理由であると考えられる。

図 4 は目視規模が大、中、小、上位層気楼発生無しの気温差の変化をそれぞれ示している。紫線、緑線、青棒はそれぞれ 42m 高の気温、7m 高の気温、およびそれらの気温差を表し、赤線はガウス分布による気温差の近似曲線を表している。これらの図から、気温差の積分値と上位層気楼が見られる気温変化層の発生と発達に関係があることが示唆された。

### 3. 2 上位層気楼発生期待度の予測

図 4 に示した気温差の近似曲線より、正の気温差は日没後の 18 時から出現し、翌日 1 時から 3 時の深夜にピークを示したのち、日の出後の 8 時

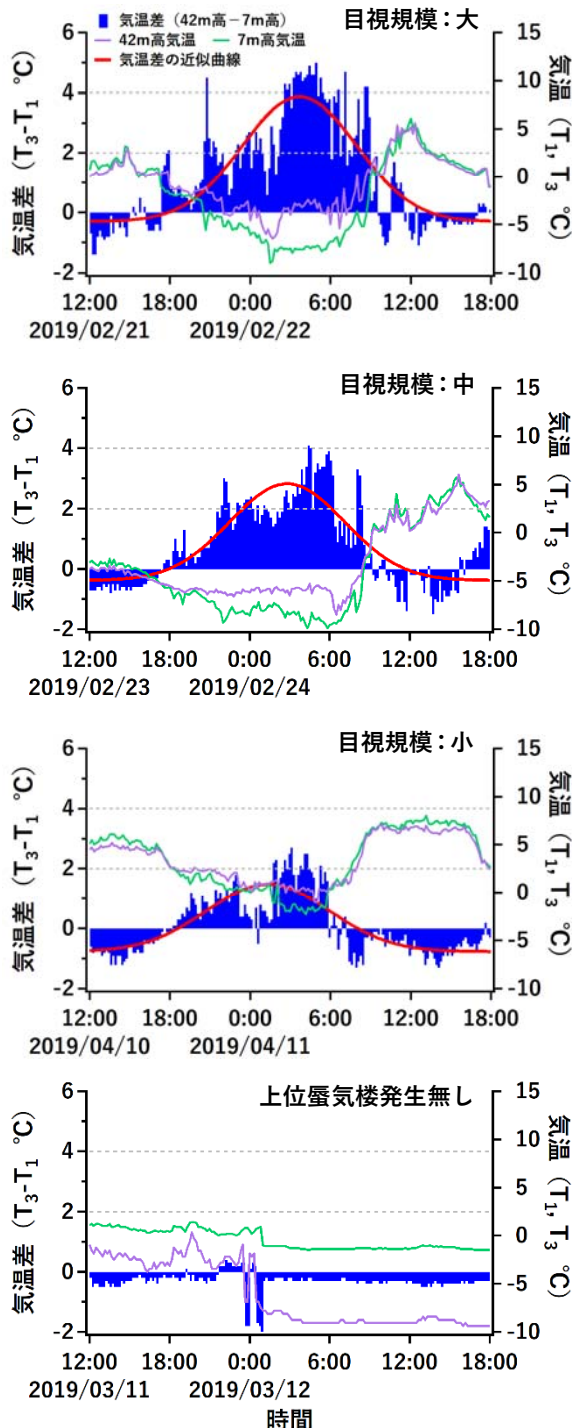


図 4 鉄塔気温計による気温 ( $T_3$ : 42m 高 (紫線),  $T_1$ : 7m 高 (緑線)) および気温差 ( $T_3 - T_1$ : 青棒) の変化の例. 上から順に目視で観測された上位層気楼の規模・大, 中, 小, 発生無しの例を示している。

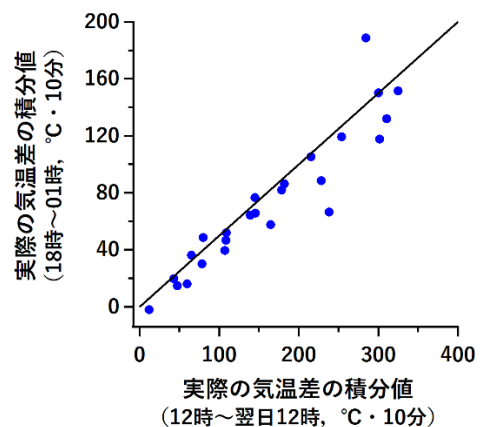


図 5 気温差の 24 時間積分値と 7 時間積分値の比較

から 12 時に負の値に転じる。気温差の変化がガウス分布の近似曲線のように左右対称であると仮定すると、18 時から 1 時まで 7 時間の気温差から、その後 7 時間先までの気温差が同様に変化すると考えることができる。

図 5 は 12 時から翌日 12 時までの 24 時間で積分した気温差と、18 時から翌日 1 時まで 7 時間で積分した気温差の関係を示したものである。この図から、18 時～1 時の気温差積分値がその日の気温差の 24 時間積分値と高い相関があることがわかる。このことから、18 時～1 時の夜間の気温差データから翌朝 6 時から 12 時の上位蜃気楼の発生の期待度を推定できる可能性が示された。18 時～1 時の気温差の 7 時間積分値が  $100^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上を期待度 A、 $50^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上  $100^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分未満を期待度 B、 $5^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上  $50^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分未満を期待度 C と定義した。

### 3. 3 上位蜃気楼発生時間の予測について

前節で定義した 7 時間気温差積分値を用い、冷気塊が海上に移流して何時間後に上位蜃気楼が発生し始め、何時間後に消滅するか検討した。冷気塊が海上に移動して峰浜～知布泊の緯度までの海上を冷気塊が覆うことにより、この方向に上位蜃気楼が発生したと仮定すると、冷気塊が鉄塔の位置から約 6.8km の距離を移動していると考えられる。上位蜃気楼発生時のアメダスの平均風速は 1.0 から 1.9m/s であったことから、冷気塊がこの距離を移動するのに有する時間はおよそ 1～2 時間と計算される。したがって冷気塊は 19～20 時から海上を覆い始め、放射冷却の度合いによって翌日 2～5 時の範囲にピークを示し、10～13 時頃まで上暖下冷の状態が継続され上位蜃気楼を観測することが可能であると考えられる。

### 4 まとめと考察

本研究は鉄塔に設置した気温計のデータと気象庁の数値予報データから、上位蜃気楼の発生を予測する手法を検討した。既往研究では光学シミュレーションによって上位蜃気楼の見え方と気温差の関係を推定する試みは多くなされているが、温度差以外にも複雑な要因があり単純ではないとされている。本研究では目視規模と 42m 高と 7m 高の気温差の積分値との間に関連が認められ、予報指標として実用性があることが示唆された。その結果、18 時から 1 時までの気温差の積

分値から、翌朝 6 時から 13 時頃までの蜃気楼発生の期待度の高さを定性的に A から C で表現し、発生時間を予測する手法を提案した。本研究では目視で蜃気楼を確認した事例のみに着目していることから、今後は蜃気楼が確認できていない日の積算値についても調査を行い、風や雲量等のパラメータも考慮した予測を行う予定である。

### 【謝辞】

本研究の一部は、一般社団法人 WNI 気象文化創造センターの助成（第九回気象文化大賞）を受けて実施した。本研究はデータ収集・解析・公開プラットフォームとして、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム（DIAS, 課題番号: JPMXD0716808999）を利用した。

### 【参考文献】

- 1) 日本蜃気楼協議会, 2016: 蜃気楼のすべて!, 草思社, 108pp.
- 2) 大鐘卓哉, 加藤宝積, 佐藤トモ子, 2013: 流氷の蜃気楼の観察と「幻氷・おぼけ氷」に関する考察, 北海道の雪氷, **32**, 26-29.
- 3) 佐藤トモ子, 2015: 斜里町における上位蜃気楼の記録, 知床博物館研究報告, **37**, 43-52.
- 4) 石原宙, 館山一孝, 佐藤トモ子, 小林一人, 2018: 冬季の斜里における上位蜃気楼の発生状況の調査-ドローンを用いた鉛直気温分布の観測手法の確立-, 雪氷, **80**(3), 213-226.
- 5) 館山一孝, 佐藤和敏, 佐藤トモ子, 小林一人, 鈴木一志, 2018: LPWA を利用したオホーツク地域の蜃気楼発生予測・公開システムの開発, 北海道の雪氷, **38**, 11-14.
- 6) 株式会社ウェザーニューズ, 1997: 蜃気楼の発生予測方法並びに予測装置. 特開平 09-152491.
- 7) 堀口貴司, 瀬山滋, 2012: 蜃気楼予測と検証 (H24 年 4 月 28 日～5 月 1 日). 日本蜃気楼協議会, 平成 24 年度研究発表会講演要旨
- 8) 金子和真, 2008: 北海道の蜃気楼予測について. 日本蜃気楼協議会, 平成 20 年度研究発表会講演要旨
- 9) 岡本尚也, 2019: 観光が日本の根幹産業になるために～北海道のサービス産業の展望～. 気象ビジネス推進コンソーシアム (WXBC) セミナー2019 in 北海道.